

Московский физико-технический институт
(Государственный университет)
Департамент молекулярной и биологической физики

Физические методы исследования

Лекция 3

**Общие проблемы измерений
Измерение давления. Введение**

г. Долгопрудный, 2 марта 2017г.

Лекции будут доступны в том числе и здесь:



https://drive.google.com/drive/folders/0B_4u1a_RllwwYXdING93N05QM2s?usp=sharing

Литература по теме «Общие проблемы измерений»

Максимычев А.В. Физические методы исследования. 1. Погрешности измерений. М., МФТИ, 2006.

Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М. Мир, 1985.

Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. Высшая школа, 2002.

Х.-И. Кунце Методы физических измерений. М. Мир, 1989.

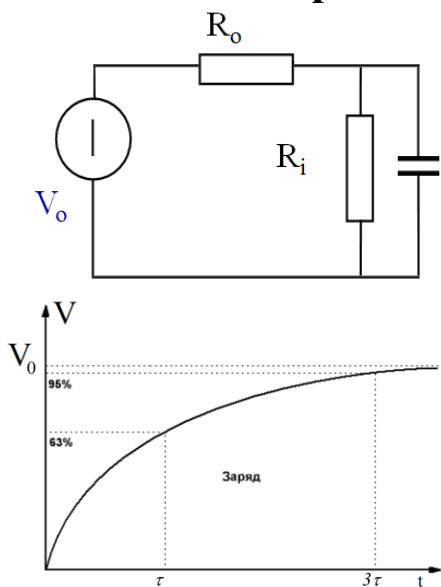
Н.С. Маркин Основы теории обработки результатов измерений, М.: Издательство стандартов, 1991. — 176 с.

Харт Х. Введение в измерительную технику. М. Мир, 1999.

М.И. Пергамент Методы исследований в экспериментальной физике. Изд-во Интеллект, 2010

Lib.mipt.ru

Время измерения



$$I_R = I_0 - I_c$$

$$q = CV_i; I_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{dV_i}{dt}$$

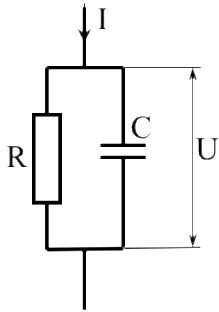
$$V_i = I_R R_i = R_i (I_0 - I_c) = V_{i\infty} - R_i C \frac{dV_i}{dt}$$

$$\frac{dV_i}{V_i - V_{i\infty}} = - \frac{dt}{R_i C}$$

$$V_i = V_{i\infty} \left(1 - \exp \left\{ - \frac{t}{\tau} \right\} \right)$$

$$\tau = R_i C$$

Амплитудно-частотная характеристика



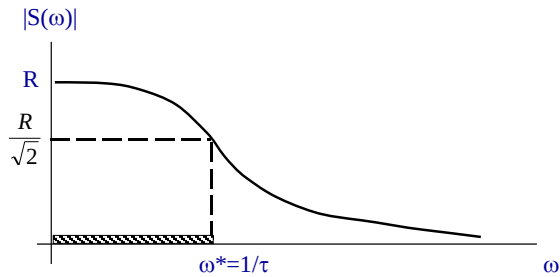
$$x \equiv I; y \equiv U; S = \frac{y}{x}$$

$$U = ZI = I \frac{Z_R Z_C}{Z_R + Z_C}$$

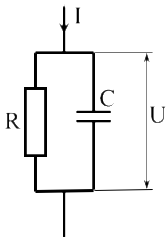
$$S = Z = \frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC} = \frac{R(1 - j\omega\tau)}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$$АЧХ \equiv |S(\omega)|$$

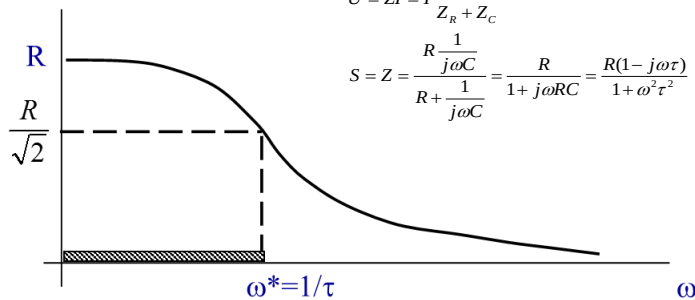
$$|S(\omega)| = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}}$$



Амплитудно-частотная характеристика



$$|S(\omega)|$$



$$x \equiv I; y \equiv U; S = \frac{y}{x}$$

$$U = ZI = I \frac{Z_R Z_C}{Z_R + Z_C}$$

$$S = Z = \frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC} = \frac{R(1 - j\omega\tau)}{1 + \omega^2\tau^2}$$

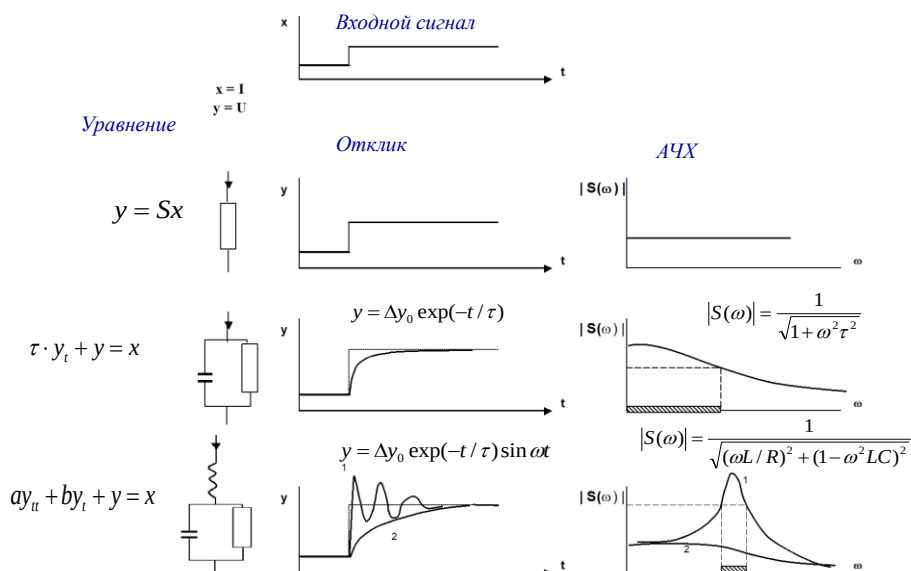
$$АЧХ \equiv |S(\omega)|$$

$$|S(\omega)| = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}}$$

$$Re(S) = \frac{R}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$$Im(S) = -\frac{R\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

АЧХ и функция отклика

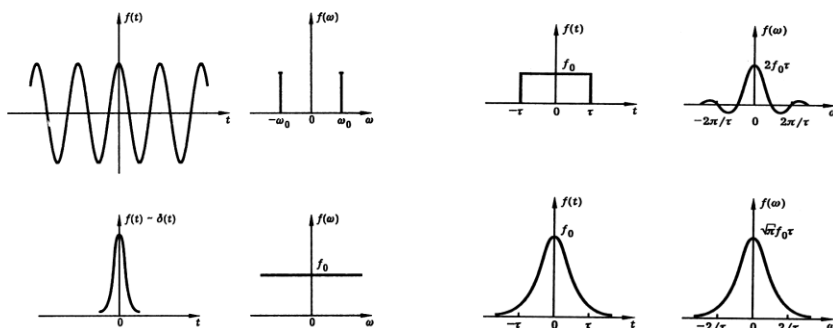


Преобразование Фурье

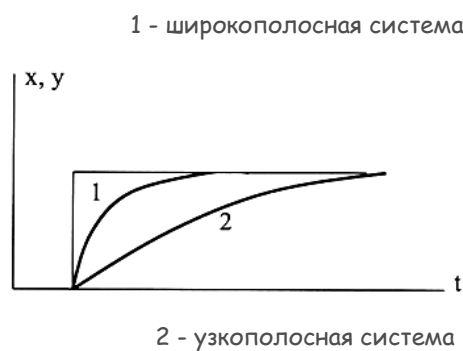
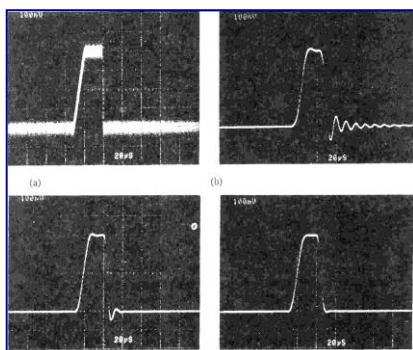
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$\Delta\omega \cdot \Delta t \sim 1$$



Полоса пропускания и время отклика



$$\Delta\omega \cdot \Delta t \sim 1$$

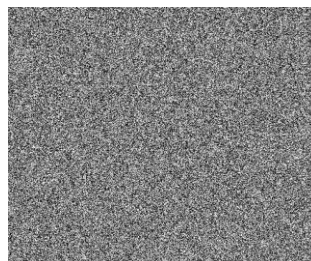
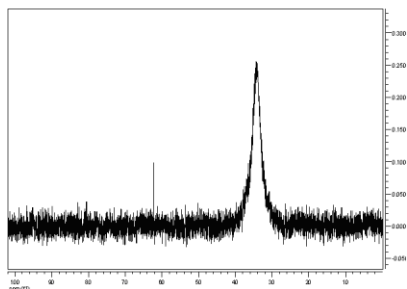
Шумы

$$S \text{ П М Ш} \quad N \equiv \frac{dP_N}{df}$$

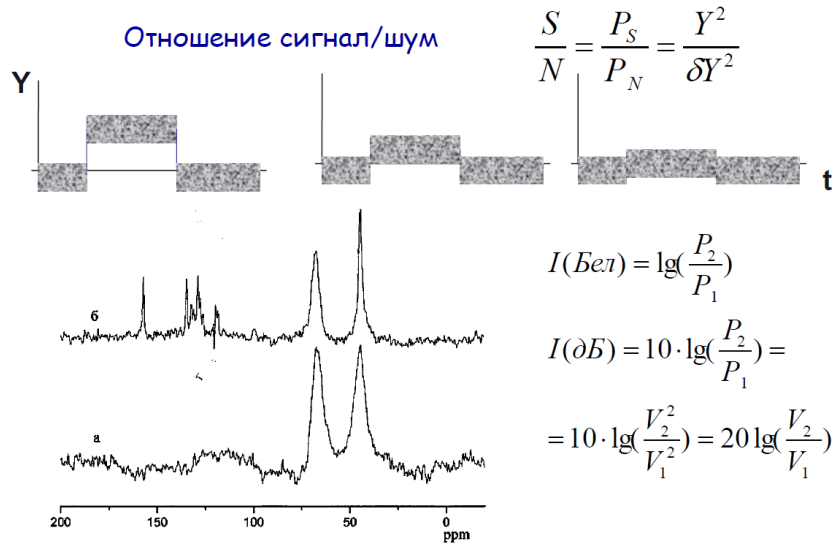
$$P_N = \int_{\Delta\omega} N(\omega) d\omega$$



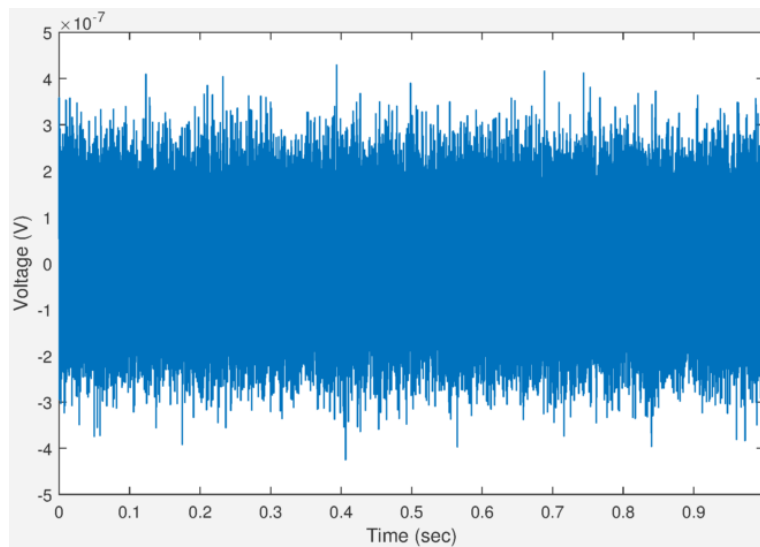
$$S/N = \frac{P_S(\Delta\omega)}{P_N(\Delta\omega)}$$



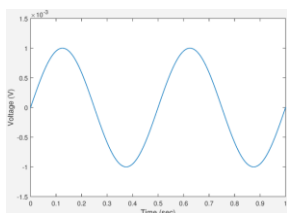
Характеристики измерений



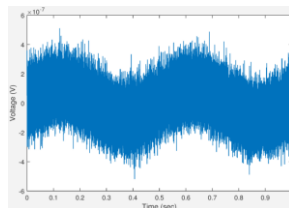
Electrical Noise



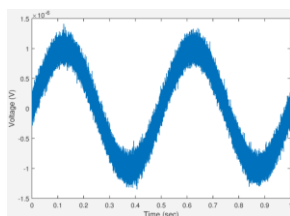
Electrical Noise



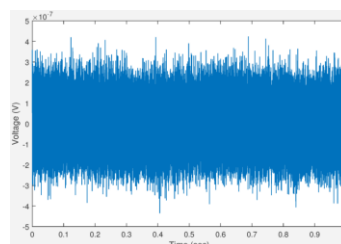
Electrical Noise Not a Problem



Signal Just Bumps Noise Up and Down

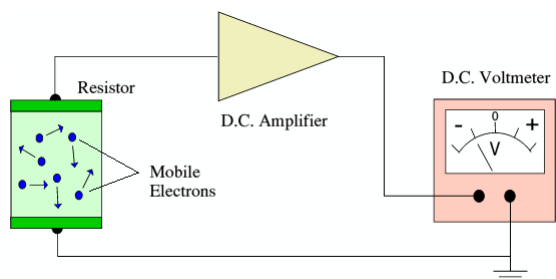


Electrical Noise Very Noticeable



Signal Lost in the Noise

Тепловой шум (шум Найквиста)



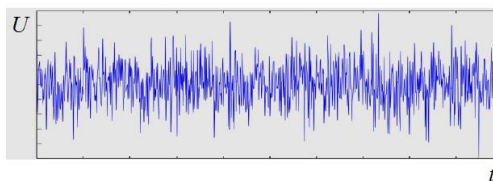
Jonson Noise or Nyquist Noise



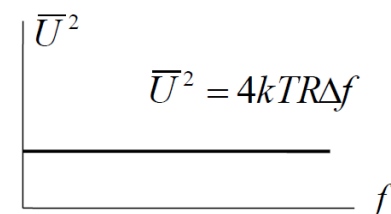
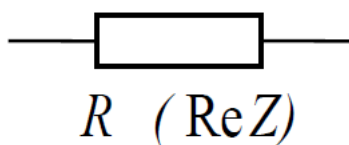
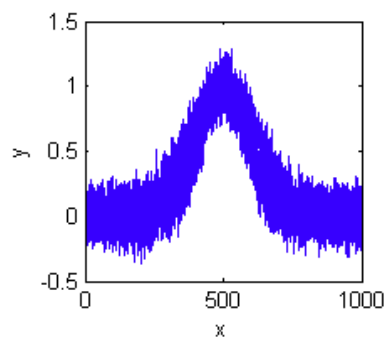
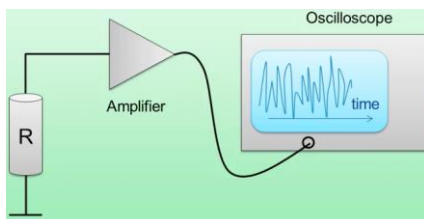
John (Hick) Bernard Johnson



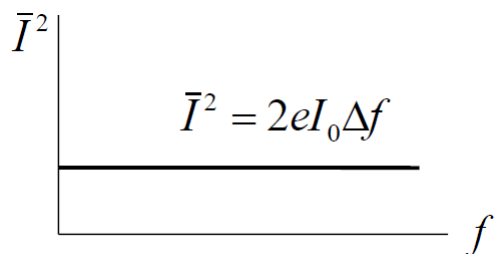
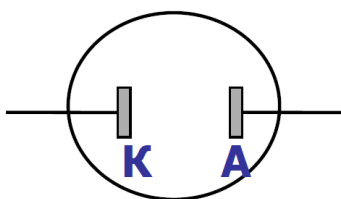
Harry Nyquist



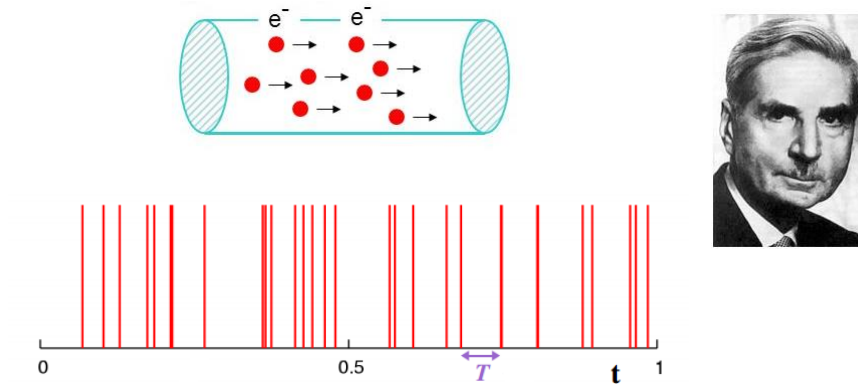
Спектрально независимый «белый» шум



Неравновесный дробовой шум



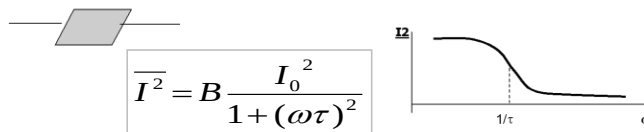
Shot noise in electron transport



Proposed by Schottky to measure the electron charge in 1918

Спектрально зависимый шум

Генерационно - рекомбинационный

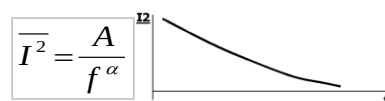


Импульсный



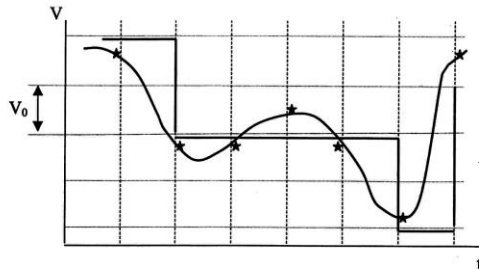
Фликкер (1/f)

Johnson (1925)



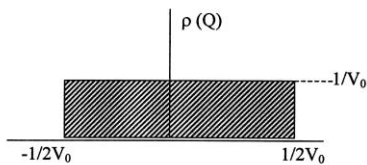
Шумы цифровой записи

$$V_0 = \frac{V_i}{2^n}$$



$$|Q| \cong V_0 / 2 = \frac{V_i}{2^{n+1}}$$

$$D = \sigma_Q^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (Q - \bar{Q})^2 \rho(Q) dQ$$



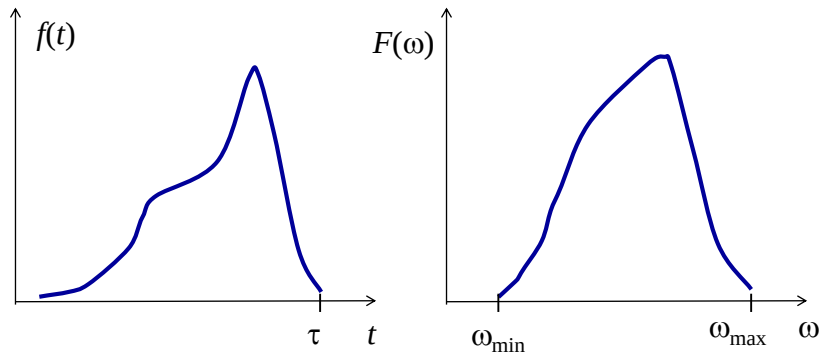
$$D = \int_{-\infty}^{+\infty} Q^2 \rho(Q) dQ = \int_{-V_0/2}^{+V_0/2} Q^2 \rho(Q) dQ = \frac{Q^3}{3V_0} \Big|_{-V_0/2}^{+V_0/2} = \frac{V_0^2}{12}$$

$$\sigma_Q = \frac{V_0}{2\sqrt{3}} = \frac{V_i}{2^n \cdot 2\sqrt{3}} = \frac{V_i}{2^{n+1} \cdot \sqrt{3}}$$

$$N \equiv \frac{dP_N}{df}$$

$$N(V_i) = \frac{\sigma_{Q_i}^2}{f} = \frac{V_i^2}{3 \cdot 2^{2(n+1)} \cdot f}$$

Частота выборки – теорема Котельникова-Шеннона



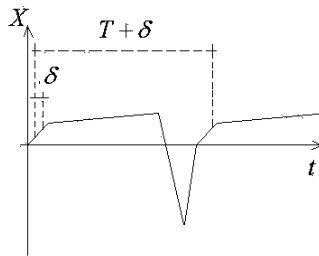
Сохранение полной информации о форме исходного аналогового сигнала возможно лишь в том случае, если частота выборки f_s по крайней мере вдвое превышает максимальную частоту в спектре аналогового сигнала

$$f_s \geq 2\omega_{\max}/2\pi$$

Полоса пропускания (Df_{mes}) и спектральная ширина сигнала (Df_{sign})

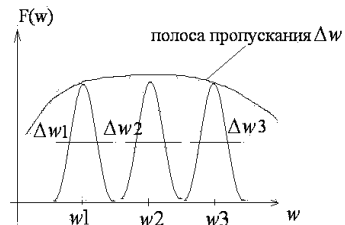
$$\Delta f_{mes} \ll \Delta f_{sign}$$

Когерентная выборка



$$\Delta f_{mes} \gg \Delta f_{sign}$$

Частотное мультиплексирование

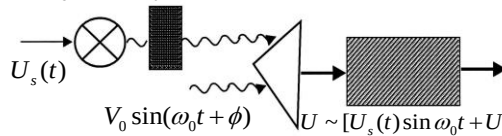


$$\Delta f_{mes}^* = \Delta f_{mes} \frac{T + \delta}{\delta} \sim \Delta f_{mes} \frac{T}{\delta} \dots \rightarrow \Delta f_{mes} \frac{nT}{\delta}$$

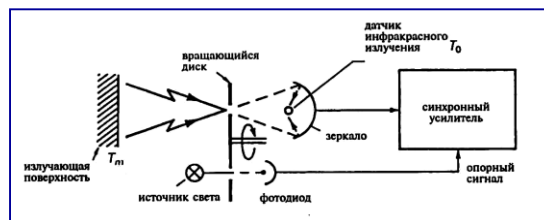
Защита от шумов и помех

1. Сигнал $\sim \sin w_0 t$ - максимально возможное сужение полосы пропускания
2. Сигнал $\sim Const$ - синхронное детектирование

$$U_s(t)\sin\omega_0t \quad U_s(t)\sin\omega_0t+U_N$$



$$V_0 \sin(\omega_0 t + \phi) \sqrt{U \sim [U_s(t) \sin \omega_0 t + U_N(t)] V_0 \sin(\omega_0 t + \phi)} = \\ = \frac{U_s(t) V_0}{2} [\cos \phi - \cos(2\omega_0 t + \phi)] + V_0 U_N(t) \sin(\omega_0 t + \phi)$$



Характеристики измерительных систем

Чувствительность $S = \frac{y}{x}$ $S_{dif} = \frac{dy}{\delta x}$ X – входной сигнал
Y – выходной сигнал

Разрешающая
способность $R = \frac{x}{\delta x}$

Динамический
диапазон $D = \frac{x_{\max}}{x_{\min}} \rightarrow \frac{x_{\max}}{\delta x}$

Пространственное
разрешение $\delta x = \int_S x_S dS = \int_V x_V dV$

Время измерения $\delta x = \int_{\tau} x(t) dt$

δx – порог обнаружения !!!